

GaAs/AlGaAs 近表面单量子阱 的光调制光谱研究

刘兴权 陆 卫 徐文兰 穆耀明 陈效双 马朝晖 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家实验室 上海 200083)

摘要 我们利用光调制反射光谱研究了 GaAs/AlGaAs 单量子阱, 观察到了电子的 11H 及 11L 跃迁. 通过改变表面垒的厚度, 使得真空垒对阱中电子态影响发生变化, 由于量子阱中电子态所受的约束的加强, 我们观察到了价带到导带的跃迁明显的蓝移 (HH1 到 E1, LH1 到 E1). 这种蓝移的现象可以用方势阱加真空势垒及内建电场的模型来解释

PACC: 4260F, 4280K

1 引言

光调制光谱 (PR) 作为一种非接触式光谱手段, 已经得到了广泛的应用. 它在室温下有很高的灵敏度和分辨率, 对研究半导体结构的电子态是一种非常好的光谱手段. 人们利用 PR 对二维系统如量子阱, δ 掺杂, 异质结等结构进行了很多研究, 尤其是表面单量子阱结构, PR 比光致发光 (PL), 透射光谱等光谱手段有很大的优越性, 它可以同时研究单量子阱结构中价带轻重空穴 (LH, HH) 到导带子带的跃迁. 当量子阱中的电子态所受的约束发生变化, 可以通过 PR 的方法来研究带间跃迁的变化, 包括 LH, HH 到电子子带跃迁的能量移动, 振子强度的变化等. 本文就是利用 PR 的方法研究了真空势垒或表面氧化层对表面单量子阱中子能级位置的影响随表面垒厚度的变化而变化, 包括带间跃迁的蓝移.

对于表面真空量子阱的研究, 曾有一些报道, 主要是荧光研究. 对于 GaAs/AlGaAs 近表面量子阱, Moison 等观察到随表面垒变薄, HH1 到 E1 及 LH1 到 E1 的跃迁向低能方向移动, 认为是由于阱中电子态与表面态间的耦合造成^[1]. 然而, Dreybrodt 等在 GaAs/InGaAs 表面量子阱中观察到了相应的蓝移^[2]. 而本文中通过光调制光谱的方法, 获得了

刘兴权 1967 年出生, 1994 年于上海技术物理所获硕士学位, 现攻读博士学位, 主要从事 III-V 族材料分子束外延生长及物理特性研究

陆 卫 1962 年出生, 博士生导师, 主要从事半导体材料及物理研究
1996-10-17 收到, 1996-12-29 定稿

GaAs/AlGaAs 表面量子阱随着表面势垒的变薄,而发生蓝移,同时观察到 HH1 到 E1 及 LH1 到 E1 的相对强度变化

2 实验与结果

样品为用 MBE 方法在 (100) GaAs 衬底上生长的 经过预处理的衬底,用 5 : 1 : 1

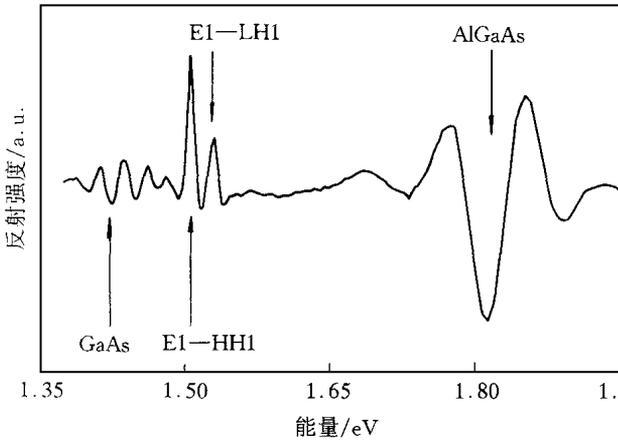


图 1 未腐蚀的表面单量子阱 PR 光谱

(H₂SO₄ : H₂O : H₂O₂) 腐蚀 3 分钟, 装到 RBER 32P R&D 系统上生长在生长了 500nm 的 GaAs 掺 Si 缓冲层后, 生长单量子阱结构 (Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As), 表面层的垒厚度, 通过腐蚀液腐蚀的方法减薄, 腐蚀液为 20 : 1 : 1 (CH₃OH : H₂O₂ : H₃PO₄), 用同样样品先对腐蚀速度定标, 确定腐蚀速度为

对光调制光谱, 用 Ar⁺ 激光器的 5145nm 为调制光, 探测器为硅光二极管 探测的信号经过锁相放大器放

大后由计算机采集数据 图 1 为表面量子阱上垒未被减薄时的 PR 全谱

从图 1 我们观察到了:

- (1) GaAs PR 信号, 来自于缓冲层;
- (2) 量子阱中 HH1 到 E1, 及 LH1 到 E1 的跃迁信号, 分别在 1.507eV, 1.529eV 处;
- (3) Al_{0.3}Ga_{0.7}As 垒的信号, 在 1.80eV.

当上半个垒被逐渐减薄, PR 谱的变化如图 2 所示 随着表面垒的减薄, 量子阱中的跃迁能级向高能方向移动, 最大的能量移动为 10meV, 与没有减薄前的光谱相比, 线形明显展宽 同时, HH1 到 E1 与 LH1 到 E1 的跃迁间的相对强度比随着垒的减薄而减小 跃迁能量, 线宽, 及跃迁强度比用 Lorentz 线形来拟合获得, 主要的结果在图 3 及图 4 中

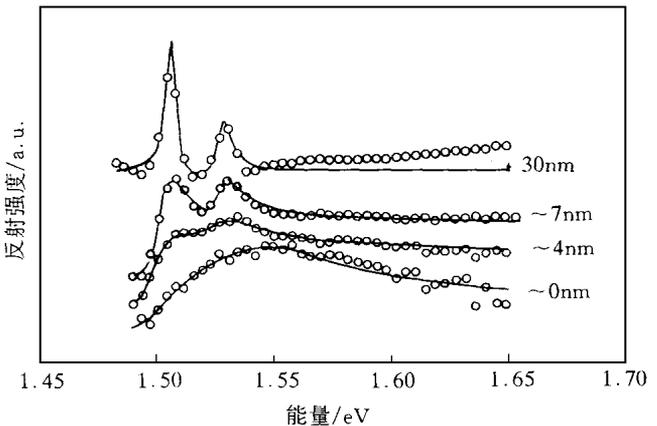


图 2 表面垒厚度被逐渐减薄后的 PR 光谱

3 结果讨论

在图 3 中, 给出实验观察到的随表面垒厚度变化跃迁能量的移动, 可以用一个简单的模

型^[2]定量描述,考虑 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 中内建电场的因素 内建电场是由于不同层半导体的 $Fermi$ 能级不同而造成的 对于表面,一般钉扎在导带下 $0.7eV$ 处,缓冲层是高掺杂的, $Fermi$ 能级接近导带底,随着上层垒的减薄,我们期待以下的效应:

(1) 量子阱中的能态还没有受到真空势垒的影响,但是,阱中的内建电场增强,使得有效带宽降低,导致能级间的跃迁红移^[3].

(2) 当上层垒的厚度趋近零时,电子及空穴的能态将受到真空势垒的影响,使之所受的约束加强,因此,跃迁能量蓝移

(3) 内建电场同时在影响着子带上电子与重空穴间的交迭积分 (ρ_{E1-HH1}) 及与轻空穴间的交迭积分 (ρ_{E1-LH1}) 比,比值 $\sigma = (\rho_{E1-HH1} / \rho_{E1-LH1})$ 将随内建电场的增强而降低

(4) 表面的粗糙度将强烈地影响跃迁的线宽

所有以上的现象在实验中都观察到了. 图 3 给出了 HH1 到 E1 与 LH1 到 E1 的跃迁能量随上层垒的厚度变化曲线 点为实验数据,实线为用传输矩阵法计算的理论曲线 能带的结构参数为常见的参数 电子的有效质量为 $m_e^* = 0.067m_0$, 重、轻空穴的有效质量分别为 $m_{hh}^* = 0.45m_0, m_{lh}^* = 0.08m_0$ 对 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 的带隙的计算,用 $E_g = 1.424 + 1.247x$, 上层垒的厚度从 30nm 到 7nm, 因有效带宽的下降而发生明显的红移^[3].

当上层垒的厚度薄于 7nm, 11H 及 11L 跃迁能量都急剧上升,这是由于真空势垒的影响 这种现象与用光致发光(PL)观察到的红移现象是不同的 我们认为,这种差异是由于两种方法的物理机制的差异造成的 PL 所观测到的是寿命长的最低能态间的跃迁,

因此量子阱中能态与表面态间的强耦合机制起主导作用^[1], 而 PR 谱中,信号只与 K 空间监界点处的态密度有关,而与在某个能态上的寿命无关,我们认为,表面量子阱中的能态被束缚的本征态密度比耦合的(本征态与表面态间)态密度高 因此,在表面量子阱中的能态是由很高密度的本征态与较低密度的耦合态组成,因此,当上层垒厚度小于 7nm 时,真空势垒的约束效应为主,而表面态与阱中态的耦合效应为次,反映在光谱上即为跃迁能量的蓝移

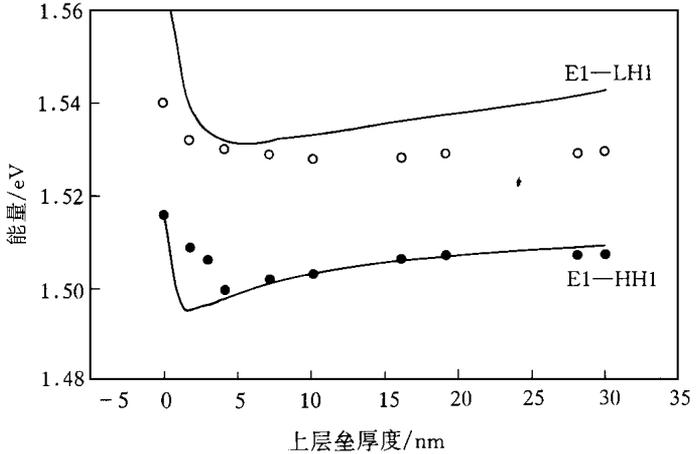


图 3 不同垒厚度下价带子带到导带子带跃迁能量的变化图

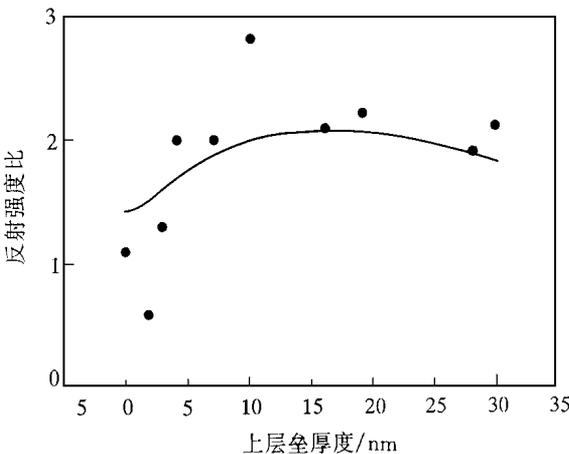


图 4 价带轻重空穴子带到导带子带跃迁强度随上层垒厚度的变化

图 4 给出了 HH1 到 E1 与 LH1 到 E1 的跃迁振子强度比 $\sigma = (\rho_{E1-HH1}/\rho_{E1-LH1})$ 随上层垒厚度变化曲线。点为实验点, 实线为拟合曲线。我们观察到了 σ 随上层垒厚度的连续变化, 因为跃迁强度和给定的价带子带及导带子带在 z 方向的交迭积分的平方成正比, 因此我们计算了 HH1 到 E1 及 LH1 到 E1 跃迁的交迭积分, 如图 4 实线所示。与实验结果相比, 吻合的不是很好, 很可能是与表面态相关, 是很复杂的, 线宽是由界面的粗糙度决定的, 很难定量计算。

4 结 论

本文用光调制光谱的方法研究了表面真空势垒对近表面 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱子带的影响。我们观察到了表面垒厚度在 10nm 内逐渐变化时, 子带间跃迁的蓝移。该现象可以用方势阱加表面真空势垒及内建电场的模型来定量计算, 该模型同时可用来解释 11H 与 11L 跃迁振子强度比的变化。11H 与 11L 跃迁的线宽随上层垒厚度的变化来自于表面粗糙度。

参 考 文 献

- [1] J. M. Moison, K. Elcess, F. Houzay, *et al.*, Phys. Rev., B, 1990 **41**: 12945
- [2] J. Dreybrodt, A. Forchel and J. P. Reithmaier, Phys. Rev., B 1993, **48**: 14741
- [3] R. M. Cohen, M. Kitamura and Z. M. Fang, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**: 1675

Study of GaAs/AlGaAs Single Quantum Well by Photomodulated Reflectance Spectroscopy (PR)

Liu Xingquan, Lu Wei, Xu Wenlan, Mu Yaoming, Chen Xiaoshuang,
Ma Zhaohui and Shen Xuechu

(Shanghai Institute of Technical Physics, National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai 200083)

Received 17 October 1996, revised manuscript received 29 December 1996

Abstract We use photomodulated reflectance spectroscopy to study GaAs/AlGaAs single quantum well. We have observed the electronic transition 11H and 11L. As the thickness of top barrier changes, we have observed that the vacuum potential affects the in-well electron states, and the blue-shifting of 11H and 11L transition. We explain the experimental results using a simple model.

PACC: 4260F, 4280K